



DALGIÇ MOTORLAR ÜZERİNE BİR İNCELEME

Mehmet ÇUNKAŞ

Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, KONYA

mcunkas@selcuk.edu.tr

ÖZET: Petrol kuyularında ve tarımsal sulamalarda yaygın olarak kullanılan dalgıç asenkron motorlar, tasarımı ve özellikleri bakımından normal asenkron motorlara çok benzemektedir. Bu motorların, yüksek akım yoğunluğu ile çalışması, boylarının uzun olması ve su ile soğutulması önemli özellikleri olarak sıralanabilir. Bu makalede dalgıç asenkron motorlar konusunda literatürde yer alan çalışmalar ele alınmış ve bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca tasarım ve performans karakteristikleri ile ilgili yapılan iyileştirmeler üzerinde durulmuştur. Literatürde, normal asenkron motorlarla ilgili birçok çalışma yer almasına rağmen dalgıç asenkron motorlarla ilgili çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Dalgıç Asenkron motorlar, Tasarım optimizasyonu, Karakteristik Özellikler*

A Review on Submersible Motors

ABSTRACT: Submersible induction motors which are widely used in oil wells and agricultural irrigations are very similar to the normal asynchronous motors in terms of design and features. A high current density, cooling with water and long of lengths are important features of these motors. In this paper, the studies related with submersible motors in the literature are deal with and analyzed. Besides, the emphasis was placed on improvements to the design and performance characteristics. In the literature, there are many studies on induction motors but are limited studies on submersible induction motors.

Key Words: *Submersible induction motors, Design optimization, Characteristic Properties*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dalgıç Asenkron Motorlar (DASM), asenkron motorların özel bir tipi olup, tasarımı ve özellikleri biraz farklılık göstermektedir. DASM'lar, dalgıç pompa ile birlikte su içerisinde çalıştığından motorun soğutulması hava yerine su ile yapılmaktadır. Bu yüzden stator ve rotor akım yoğunlukları oldukça yüksektir. Yüksek güçteki dalgıç asenkron motorların stator sargılarının çok iyi yalıtılması gerektiğinden, vernikli tel yerine PVC izolasyonlu tel kullanılmaktadır. Dalgıç motorun içinin, hava ile teması tamamen kesilmiştir. Sargılarda ve kısa devre sincap kafesli rotorda oluşan ısı, motorun içine dökülen yağ ya da gliserin ile

uzaklaştırılmaktadır. Böylece motorun dönen kısımlarının da yağlanması sağlanmış olmaktadır. Normal ASM'lerde motor çapı ile boyu belli bir oranda değişirken DASM'lerde motor çapı sabit kalır, ancak motor boyu uzatılabilir. Güç artışı sağlamak için motor boyunun aşırı uzatılması, mekanik ve imalat yönünden bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Örneğin; motor boyu aşırı uzun olduğunda, yataklama ve bobinlerin oyuklara yerleştirilmesi oldukça zordur. DASM'lerde hava aralığının büyük değerlerde olması, mıknatıslanma akımının daha büyük olması dolayısıyla güç faktörünün küçük olmasına neden olmaktadır. (Choudhury ve Azizur Rahman, 1992; Bilgin 2002).

Dalgıç motorlar olarak genelde dalgıç asenkron motorlar üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı sadece iki çalışmanın (Ahmed ve Toliyat 2007, Jianjung ve diğ. 2010) sürekli mıknatıslı senkron dalgıç motorlar konusunda olduğu görülmektedir. Yapay zeka teknikleri kullanarak yapılan optimizasyon çalışmaları ise çok az sayıdadır. (Çunkaş ve Ürkmez 2008; Çunkaş ve diğ. 2011). Diğer bazı araştırmalar ise; arıza teşhisi (Arabacı ve diğ. 2007; Xin ve diğ. 2012), güç tüketimi (Liang ve Fleming 2012), izolasyon ömrü (Liu ve diğ. 2011), sürme ve hız kontrol sistemleri (Kirby ve diğ. 2005; Maswood 2006; Choudhury ve Azizur Rahman, 1992), motor dahil komple dalgıç pompa sisteminin modellenmesi (Thorsen ve Dalva (2001; Batista ve diğ. 2009; Kirvelis ve Davies 2003), motorun yüksek gerilim dayanıklılık testleri (Metwally ve diğ. 2007), motorun soğutma sistemi (Egidi ve diğ. 2012), sıcaklık dağılımı ve termal modelleme (Meng ve diğ. 2010) gibi sıralanabilir.

Bu makalede, dalgıç motorlarla ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar ele alınarak bir değerlendirme sunulmuştur. Asenkron motorlarla ilgili birçok çalışmanın mevcut olması, dalgıç motorlarla ilgili sınırlı sayıda çalışmanın olması nedeniyle bu konu üzerinde durulmuştur. Yapılan inceleme sonuçlarından, istatistiksel yöntemler kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmalarının çok fazla olmadığı, performans ve karakteristik özellikleri inceleyen çalışmaların nispeten fazla olduğu, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tasarım ve analiz çalışmalarının ise yoğunlukta olduğu görülmektedir.

DALGIÇ İNDÜKSİYON MOTORLARIN YAPISI (STRUCTURE OF SUBMERSIBLE INDUCTION MOTOR)

Dalgıç motorun alt kısmına yerleştirilmiş olan karbon yataklar motorun rotor ağırlığını taşımaktadır. Karbon arasına giren yağın veya gliserinin ince bir film tabaka oluşturarak sürtünmeyi en aza indirmesi sonucunda rotorun daha rahat dönmesi sağlanır. Kuyudaki su basıncı ile motor içerisinde bulunan sıvının basıncı arasında oluşan basınç farkı, karbon yataklar ve genişleme diyaframı aracılığıyla dengelenmektedir. Mekanik keçe (Karbon/Seramik), maksimum sızdırmazlığın

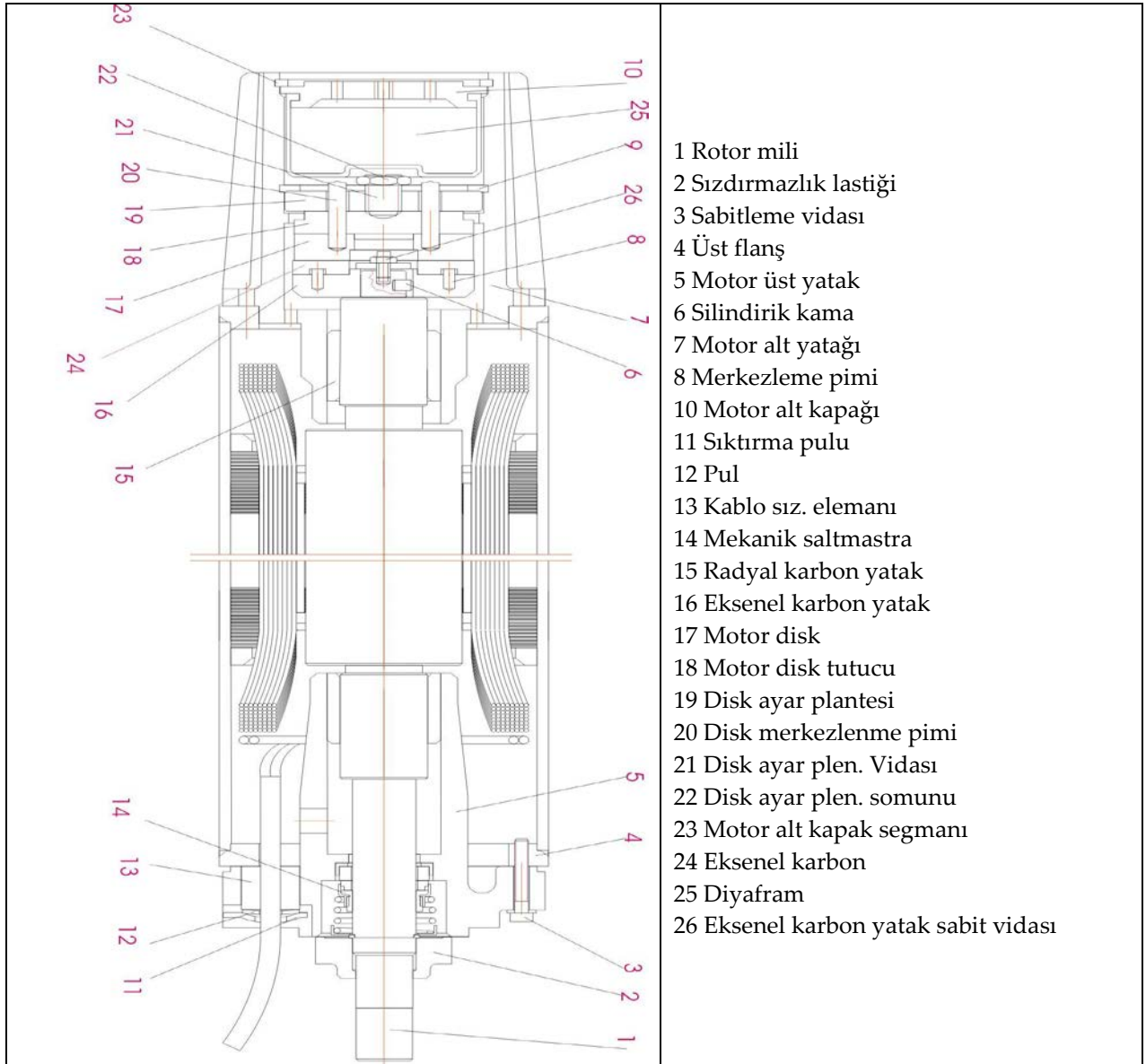
sağlanması ve katı maddelerin motora girmemesi amacıyla kullanılmaktadır. Radyal yataklarda, yatak burçları karbondan, mil burçları ise dış yüzeyi sert krom kaplanmış yüksek mukavemetli çelikten imal edilmektedir. Eksenel (Mitchell) yatak, karbon ve sertleştirilmiş paslanmaz çelik malzemeden imal edilmektedir. Gücü 7.5 kW' a kadar olan DASM'lara "doğrudan", 11 kW ve daha büyük güçte olan DASM'lara "yıldız-üçgen" yol verilmektedir. Şekil 1'de bir DASM'nin kesiti görülmektedir.

Standart DASM'ler 30°C ve daha düşük su sıcaklıklarında çalışmak üzere tasarlanmakla birlikte daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen dalgıç motorlar da mevcuttur. Daha yüksek sıcaklıklara dayanabilecek pahalı malzemeler kullanılarak üretilen bu motorlar, genelde petrol kuyularında kullanılmak için geliştirilmiş olup 140°C sıcaklığa kadar kullanılabilir. Bu motorların üzerinde motor gövdesinden daha büyük bir sızdırmazlık ve genişleme bölümü vardır. İletkenlerdeki kayıpları azaltmak için yüksek gerilimli (380-5000V) olarak yüksek güçlerde üretilirler. API standartlarına uygun kuyulara girebilmesi için motor dış çapları 89-190 mm. arasındadır. Rotor uzunlukları genellikle 300-600 mm olup, gücü arttırmak amacıyla motorlar birbirine eklenmektedir. Örneğin 300 kW gücünde bir motorun uzunluğu 9 metre ve 550 kW gücündeki bir tandem motorun uzunluğu 27 metredir. Motor dışından geçen akışkan hızının 0.3 m/s'den daha fazla olması sağlanarak motorların soğutulması gerçekleştirilmektedir (Ertöz, 2001).

DASM'lar dalgıç pompalarla akupile edilerek kullanılmaktadır. Bağlı uzama, dalgıç pompalarda uzun mil bulunmadığı için bir problem teşkil etmez. Pompalarda oluşan eksenel kuvvetin yönünün yukarıya doğru olması, pompaların basma yüksekliklerinin gereğinden fazla olması anlamına gelmektedir. Bu nedenle motorun içinde bulunan ters yöndeki eksenel yük yatağı, bir kaç dakika içerisinde görevini yapamaz ve motor arızalanır. Çarklara etki eden eksenel hidrolik kuvvetlerin dengelenmesiyle pompaların eksenel yükleri azaltılabilir. Öngörülen bir debi için dengelenen çarklar, tasarım debisinden daha fazla debide çalıştırılırsa yukarı doğru, tasarım debisinden

daha az debide çalıştırılırlarsa aşağı doğru itilirler. Açığa çıkan gazların pompaya girişinin önlenmesi ve pompanın sağlıklı çalışması gaz ayırıcı bölüm aracılığı ile sağlanır. Düşey milli türbin tipi pompaların verimlerinin düşük olması kolon milinde meydana gelen sürtünme, titreşim ve sarsıntılardan kaynaklanmaktadır.

Ayrıca montaj zorluğu ve mekanik arızaların çok fazla meydana gelmesi dalgıç pompaların kullanımını yaygınlaştırmıştır. Dalgıç pompaların ilk yatırım maliyeti düşey milli türbin tipi pompalara göre yüksek olmakla beraber işletme masrafları oldukça düşüktür (Ertöz, 2001).



Şekil 1 Dalgıç Asenkron Motorun kesiti (Cross-section of submersible induction motor)

OPTİMİZASYON (OPTIMISATION)

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonu farklı amaçların bir arada değerlendirilmesidir. Örneğin boyutları küçük olmalı, üretim maliyeti düşük olmalı, verimi ve

güç faktörü yüksek olmalıdır. Bu durum tasarımcıyı çok kriterli optimizasyona yönlendirmektedir (Lähteenmäki 1997). Tasarım optimizasyonu, birçok parametre ve değişkenleri içermesi nedeniyle karmaşık bir konudur. Çoğu motor parametreleri motor performansını lineer

olmayan bir şekilde etkilemektedir. Bu yüzden tasarım süreci ve metotları önemini sürdürmektedir. Optimum bir tasarımda belirlenen amaçları minimum veya maksimum yaparken sınırlamaların da dikkate alınması gerekmektedir. Amaç fonksiyonu olarak, verim, maliyet, ağırlık veya tork kullanılabilir. Eğer çok kriterli optimizasyon düşünülürse bu amaçların iki veya daha fazlası aynı anda göz önüne alınması gerekir. Son zamanlarda endüksiyon motorları tasarımında, çok kriterli optimizasyon yaygın olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Bolde ve Nasar 2002).

Dalgıç asenkron motorlar endüksiyon motorlarına çok benzediği için endüksiyon motorlarının optimizasyonunda kullanılan tasarım parametreleri dalgıç asenkron motorlarda da kullanılmaktadır. Bunlar; bir faz sarım sayısı, stator demir uzunluğu, bilezik genişliği, stator iç çapı, stator oyuk yüksekliği, stator oyuk genişliği, hava aralığı, kapalı rotor oyukunun hava aralığına olan mesafesi, rotor çubuk çapı, stator dış çapı olarak sıralanabilir.

Tasarım değişkenleri sayısı kısıt fonksiyonlarına bağlı olarak değiştirilebilir. Kısıt fonksiyonu olarak kullanılan parametreler; kalkınma akımının nominal akıma oranı, kalkınma momentinin nominal momente oranı, devrilme momentinin nominal momente oranı, güç faktörü, stator sıcaklığı, stator dolgu faktörü, stator akım yoğunluğu, rotor akım yoğunluğu, stator ve rotor dişleri akı yoğunluğu, stator ve rotor boyunduruk akı yoğunluğudur (Boldea ve Nasar 2002).

Optimizasyon aşamasında, tasarım değişkenleri, kısıt fonksiyonları ve bu değişkenlerin birbiriyle doğrusal olmayan ilişkileri göz önüne alınmaktadır.

Tek amaç fonksiyonlu optimizasyon problemi genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\min F(x)$$

$$\begin{aligned} h_j(x) &= 0 & j &= 0, \dots, n \\ g_i(x) &\leq 0 & i &= 0, \dots, m \\ x_k^l &\leq x_k \leq x_k^u & k &= 0, \dots, K \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $F(x)$ amaç fonksiyonunu, h_j ve g_i sırasıyla eşitlik ve eşitsizlik kısıt fonksiyonlarını, x_k^l, x_k^u tasarım değişkenlerinin alt sınır ve üst sınırını ifade etmektedir. Optimizasyon

problemleri genellikle minimizasyon olarak tanımlanır. Maksimizasyon probleminde, amaç fonksiyonu $F(x)$ yerine $-F(x)$ alınır ve minimizasyon problemi olarak çözüm yapılır. Deterministik ve istatistiksel metotlarda, kısıt fonksiyonlarını optimizasyona dahil etmek için değişik yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin istatistiksel metotlarda kısıt fonksiyonlarını optimizasyona dahil etmek için aşağıda verilen bir yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır (Palko 1996).

$$F(x) = F(x) + \sum_{i=1}^n r_i \{ \max[0, g_i(x)] \}^2 \quad (2)$$

Burada r_i penaltı katsayısını, x tasarım değişkenleri vektörünü, $g(x)$ ise kısıt fonksiyonunu göstermektedir.

$$\max[0, g_i(x)] = \begin{cases} 0 & \text{Eğer } g_i(x) \leq 0 \\ g_i(x) & \text{diğer} \end{cases} \quad (3)$$

Eşitlik kısıt fonksiyonu $h_j(x) = 0 \quad j = 0, \dots, n$ optimizasyona aşağıdaki gibi dahil edilir.

$$F(x) = F(x) + \sum_{j=1}^n b_j [h_j(x)]^2 \quad (4)$$

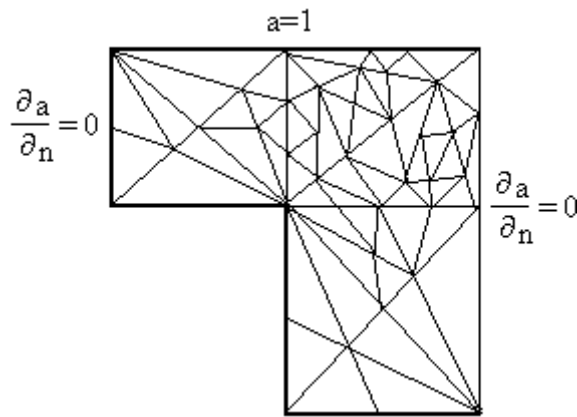
Optimizasyon metotları; Deterministik metotlar ve İstatistiksel metotlar olarak iki ana grupta toplanabilir. Genellikle türev bilgilerine ihtiyaç duyan deterministik metotlar yerel ekstremuma yakınsayan yöntemler olarak bilinir. Son zamanlarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak bilgisayarların hesaplama yeteneklerinin artması ile sonlu elemanlar yöntemi gibi deterministik yöntemler için paket programlar geliştirilmiştir. Bu ticari programlar sayesinde dalgıç motorların analizleri daha kolay yapılar hale gelmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin motorların tasarım optimizasyonunda çok sık kullanılması nedeniyle aşağıdaki bu yöntem detaylı olarak ele alınacaktır.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (FINITE ELEMENT METHOD)

Elektrik motorlarının magnetik alan incelemelerinde, farklı sayısal metotlardan yararlanılır. Bunlardan bazıları; Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo

Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi ve Yük Benzetim Yöntemi'dir. Problemi en kısa sürede çözen ve doğru sonucu veren, kolayca programlanabilen bir sayısal yöntemin tercih edilmesine dikkat edilmelidir.

Dalgıç motorların magnetik alan analizinde sonlu elemanlar yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, 1960'lı yılların sonu ve 1970'li yılların başlarında mühendislik alanlarında optimizasyon tekniği olarak kullanılmaya başlandı. Elektrik mühendisliğinde bir çok problem, iki boyutlu Laplas denklemi olarak ifade edilir ve çözülür. Şekil 2'de elektrik makinasının oluk adımının yarısı gösterilmektedir. Motor analizinde, hava aralığındaki manyetik skaler potansiyel dağılımının bilinmesi gerekir. Sınır şartları, elektrik potansiyel problemlerindeki gibidir. Skaler potansiyel, demir yüzeyler boyunca sabittir ve simetrik yüzeylerde normal türev ortadan kalkar. Bu tip problemler için iki çeşit sınır şartı vardır. Bunlar, Şekil 2'de koyu çizgi ile belirtilmiş olup iletken metal yüzey boyunca sabit potansiyel değerleri ile tanımlanan Dirichlet sınır şartları ile simetrik yüzeyler boyunca normale göre alınan türevlerin sıfıra eşit olduğu Neumann sınır şartlarıdır. (Kalenderli 1996)



Şekil 2 Elektrik makinasının oluk adımının yarısının sonlu elemanlar ağı (*Finite element meshing of half of slot step in electric machinery*)

Kapalı bir bölgenin sonlu elemanlara bölünmesi, boyutları, konumları ve şekilleri isteğe bağlı olarak seçilen elemanlarla yapılır. Bu elemanlar, bir boyutlu problemlerde doğru parçaları; iki boyutlu problemlerde üçgen,

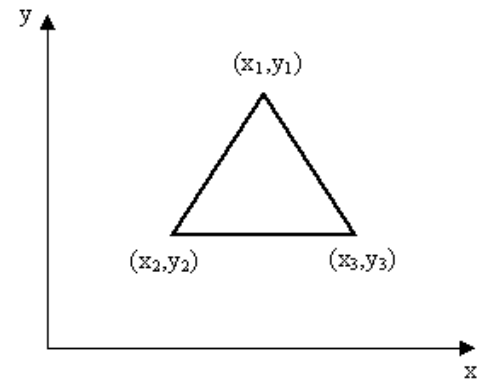
dörtgen veya çokgen; üç boyutlu problemlerde küp, prizma gibi şekillerde tanımlanabilir. Bölge içinde eleman sayısı ve dağılımı, çözümün doğruluğuna etki eden faktörlerdendir. Sonlu elemanlar yöntemi üç adımda gerçekleştirilir. (Bilgin 2002) Bunlar;

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılması ve denklemlerinin yazılması
- Elemanların birleştirilmesi
- Denklem sisteminin çözülmesi

Çözüm Bölgesinin Sonlu Elemanlara Ayrılması ve Denklemlerinin Yazılması (Separation of the solution field by finite elements and the equation formulation).

Sonlu elemanlar yöntemiyle yaklaşık bir çözüm oluşturmak için çözüm bölgesi Şekil 3'de üçgen bölgelere ayrıldığı gibi elemanlara ayrılır. Belirli bir bağıntı ile değiştiği kabul edilen her bir elemanın vektör potansiyelleri, bütün elemanlardaki vektör potansiyel dağılımları birbiriyle birleştirilir. Bu işlemler sonucunda yaklaşık bir çözüm elde edilir. Bir elemandaki vektör potansiyelin değişimi olarak alınan vektör potansiyel fonksiyonuna, "yaklaşım fonksiyonu" veya "interpolasyon fonksiyonu" adı verilir. Bu fonksiyon genellikle bir polinom şeklindedir. Şekil 3'de gösterilen tipik bir üçgen eleman için iki boyutlu yaklaşım fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Kalenderli 1996, Özoğlu 1995).

$$A(x,y)=a+bx+cy \quad (5)$$



Şekil 3 Birinci dereceden bir sonlu eleman (*First order finite element*)

Seçilen polinomların derecesi ne kadar yüksek ise doğru çözüme o kadar iyi yaklaşılr.

Ancak yüksek dereceli polinomlar hesap süresini, bellek ihtiyacını ve karmaşıklığı artırır.

Polinom fonksiyonları karmaşık durumların daha iyi tanımlanmasını sağlarken, türev alma işlemlerini de kolaylaştırır. Polinomun katsayıları, eleman üzerinde ve içinde seçilmiş düğümlerin vektör potansiyelleri cinsinden bulunabilir. Polinomun derecesinin yüksek olması, daha fazla düğüm tanımlama imkanı verir. Algoritmaların çoğunda basitleştirmek amacıyla birinci dereceden yaklaşım fonksiyonları kullanılır.

Denklem (5)'de a, b ve c sabit birer katsayı, x ve y ise kartezyen koordinatlardır. Bu polinomda katsayıları belirleyebilmek için, üçgen elemanların üç köşe (düğüm) noktasına ilişkin koordinatlarının ve vektör potansiyel değerinin bilinmesi gerekir. Birinci dereceden bir yaklaşımla, A(x,y)'nin eleman içinde ve kenarlarında doğrusal olarak değiştiği kabul edilir. Bu vektör potansiyelin bulunduğu konuma göre değeri, eleman içinde sıfırdan farklı, eleman dışında ise sıfırdır. Eleman içinde vektör potansiyelin doğrusal olarak değişmesi, vektör potansiyel bağıntısından x'e ve y'ye göre türevler alınarak bulunan alan yoğunluğunun eleman içinde sabit olması anlamını taşır. Sonuç olarak bu durumda, bir eleman içinde vektör potansiyel doğrusal değişir ve alan yoğunluğu sabittir denebilir. Buradan anlaşıldığı gibi gerçek çözümün yerini parça-parça doğrusal bir fonksiyon almaktadır. Eğer tanımlanan bölgedeki elemanların köşe noktaları ortak ise vektör potansiyel değişimi, iki elemanın arasındaki sınırda sürekli olmaktadır. Bu sınırlar arasında aralık olmadığından çözüm olarak bulunan A(x,y), parça-parça fakat tüm bölge içinde sürekli olan bir çözümdür (Kalenderli 1996).

Denklem (5)'deki a, b ve c katsayıları, A₁, A₂, A₃ noktalarındaki vektör potansiyel denklemlerinden bulunur. A₁, A₂ ve A₃ vektör potansiyelleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$A_1 = A(x_1, y_1) = a + bx_1 + cy_1 \quad (6)$$

$$A_2 = A(x_2, y_2) = a + bx_2 + cy_2 \quad (7)$$

$$A_3 = A(x_3, y_3) = a + bx_3 + cy_3 \quad (8)$$

Denklem (6), (7) ve (8), denklem (5) 'de yerine konulup yeniden düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Denklem (9)'deki katsayılar matrisinin determinantı, üçgen alanının iki katına eşit büyüklükte tanımlanabilir. Denklem (9) çözülerek a, b ve c katsayıları belirlenir. Sonuçlar denklem (5) 'de yerine konulduğunda;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

bulunur. Buradaki ters katsayılar matrisi ve x,y birleştirilerek pozisyonun yeni denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$A = \sum_{i=1}^3 A_i \alpha_i(x, y) \quad (11)$$

Burada;

$$\alpha_i = \frac{1}{2S} \{x_2 y_3 - x_3 y_2 + ((y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y)\} \quad (12)$$

pozisyonun doğrusal bir fonksiyonudur ve S üçgenin yüzey alanını temsil eder.

Üçgen elemanın içindeki enerji, denklem (14) kullanılarak belirlenebilir. Üçgen elemanın içindeki potansiyel;

$$\nabla A = \sum_{i=1}^3 A_i \nabla \alpha_i \quad (13)$$

olur ve elemandaki enerji aşağıdaki gibi bulunur.

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \int |\nabla A|^2 ds \quad (14)$$

Denklem (13), denklem (14)'de yazılırsa;

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_i \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds A_j \quad (15)$$

elde edilir. Katsayılar matrisi aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla_{\alpha_i} \nabla_{\alpha_j} ds \quad (16)$$

Burada üst indis "e" eleman anlamında kullanılmıştır. Denklem (15) matris formunda yeniden düzenlenirse;

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} A^T C^{(e)} A \quad (17)$$

Burada üst indis "T", matrisin devriğini ifade eder.

$$A^T = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}_{\text{ve}} C^{(e)} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Buna göre, örneğin C_{12} katsayısı aşağıdaki gibidir.

$$C_{12}^{(e)} = \frac{1}{4S} \{ (y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3) \} \quad (19)$$

Diğer katsayılar da benzer şekilde elde edilebilir.

Elemanların birleştirilmesi (Element Assembly)

Elemanların birleştirilmesi halinde toplam enerji, tüm elemanların enerjilerinin toplanmasından oluşur.

$$W = \sum_{e=1}^n W^{(e)} \quad (20)$$

Burada e; eleman sayısını n; düğüm sayısını göstermektedir. Düğümler birleştirilerek bir üçgen eleman haline getirilebilir. Buradan anlaşılmaktadır ki eleman sayısı ne kadar fazla olursa olsun tüm elemanlar birleştirilerek üçgen yapılmaya çalışılmaktadır. Şekil 4.a'da iki tane ayrı üçgen eleman görülmektedir. Şekil 4.b'de üçgenlerin nasıl birleştirildikleri görülmektedir. (Bilgin 2002)

Elemanlar birleştirilmeden önceki vektör potansiyellerin sütun matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir. Buradaki "ay" indisi birleşmeden önceki durumu göstermektedir.

$$A_{ay}^T = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6] \quad (21)$$

Üçgen çiftinin toplam enerjisi;

$$W = \frac{1}{2} A_{ay}^T C_{ay} A_{ay} \quad (22)$$

şeklinde. Burada C_{ay} , katsayılar matrisi (dirichlet matrisi)'dir ve

$$C_{ay} = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} & C_{12}^{(1)} & C_{13}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21}^{(1)} & C_{22}^{(1)} & C_{23}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31}^{(1)} & C_{32}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}^{(2)} & C_{45}^{(2)} & C_{46}^{(2)} \\ 0 & 0 & 0 & C_{54}^{(2)} & C_{55}^{(2)} & C_{56}^{(2)} \\ 0 & 0 & 0 & C_{64}^{(2)} & C_{65}^{(2)} & C_{66}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

olarak yazılabilir. Üçgenler birleştirildiğinde, $A_1=A_6$ ve $A_3=A_4$ olmaktadır. Aşağıda "ay" indisi, ayrı durumdaki potansiyelleri ve "b" indisi birleşik durumdaki potansiyellerdir. Buna göre vektör potansiyeller;

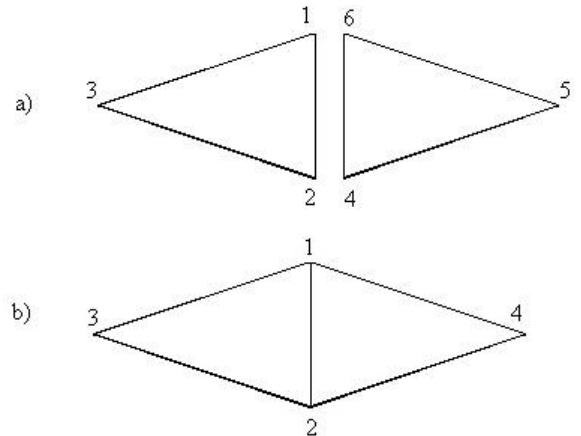
$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{bmatrix}_{\text{ay}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}_b \quad (24)$$

olarak yazılır. Toplam enerji ise;

$$W = \frac{1}{2} A_b^T C A_b \quad (25)$$

Burada;

$$C = B^T C_{ay} B \quad (26)$$



Şekil 4 a) İki ayrı üçgen eleman (Two triangular element separately) b) Birleştirilmiş üçgen elemanlar (Assembled triangular element)

şeklidir. B, bağlantı matrisini vermektedir. Şekil 4.b'deki birleştirilmiş elemanlar için

katsayılar matrisi, denklem (27)'deki gibidir. Katsayılar matrisi simetrik ve kare şeklindedir. Burada üst indisler eleman sayısını gösterirken alt indisler düğüm numaralarını göstermektedir.

$$C = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} + C_{66}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{64}^{(2)} & C_{13}^{(1)} & C_{65}^{(2)} \\ C_{21}^{(1)} + C_{46}^{(2)} & C_{22}^{(1)} + C_{44}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{45}^{(2)} \\ C_{31}^{(1)} & C_{32}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 \\ C_{56}^{(2)} & C_{54}^{(2)} & 0 & C_{55}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Denklem sistemlerinin çözülmesi (Solving of Equation Systems)

Bütün elemanların toplam enerjisi, denklem (25)'de ifade edilmişti. Birleştirilmiş elemanda Laplas denkleminin çözümü, depolanmış enerjiyi minimum yaparak elde edilir. Buna göre, her bir düğüm noktasındaki kısmi türev sıfır olmaktadır (Bilgin 2002).

$$\frac{\partial W}{\partial A_k} = 0 \quad (28)$$

Burada k, indisi vektör potansiyelinin hangi düğüm noktasına ait olduğunu göstermektedir. Buna göre denklem (28) yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\partial W}{\partial A_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n C_{ij} A_j + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n C_{ki} A_k - W_i \quad (29)$$

Burada n, düğüm sayısını i ve j düğüm noktalarını göstermektedir. İndislere göre gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\frac{\partial W}{\partial A_i} = \sum_{j=1}^n C_{ij} A_j - W_i \quad (30)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, n$$

Böylece aşağıdaki doğrusal denklem sistemi elde edilir.

$$C A = W \quad (31)$$

Her düğümde A için bu denklem sistemi çözülür, daha sonra bütün bölge için A değerleri elde edilir.

Artık günümüzde sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS ve FLUX gibi birçok ticari program geliştirilmiştir. Bu programlar

vasıtasıyla elektrik motorlarının analizi ve tasarımı daha kolay hale gelmiştir.

İSTATİKSEL METOTLAR (STATISTICAL METHODS)

Son zamanlarda elektromekanik alanında bazı yeni algoritmalar test edilmektedir. Sayısal optimizasyon metodolojisi ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler, yapay sinir ağları, bulanık mantık, tavlama benzetimi ve genetik algoritmalar gibi yeni yaklaşımlar sunmaktadır. Bütün bu algoritmalar az veya çok istatistiksel metotların özelliklerini taşımakta ve deterministik metotların kullanıldığı yerlerde daha etkin sonuçlar vermektedir. Ayrıca problem boyutu büyük olduğunda deterministik metotlara göre daha az veriye ihtiyaç duymaktadırlar (Lähteenmäki 1997).

İstatistiksel metotların avantajları;

- Sürekli ve ayırık parametreleri optimize etmesi
- Türevsel bilgiler gerektirmemesi
- Amaç fonksiyonunu geniş bir spektrumda araştırması
- Çok sayıda parametrelerle çalışma imkanı olması
- Paralel PC'ler kullanılarak çalıştırılabilmesi
- Karmaşık amaç fonksiyonu parametrelerini, lokal minimum veya maksimumlara takılmadan optimize edebilmesi
- Sadece tek çözüm değil, birden fazla parametrelerin optimum çözümlerini elde edebilmesi

olarak sıralanabilir. Her problemin çözümü için istatistiksel metotları kullanmak iyi bir yol değildir. Birkaç parametrelili analitik fonksiyonun çözümünde klasik metotlar daha hızlıdır. Böyle durumlarda, nümerik metotlar tercih edilmelidir (Haupt 2004).

DALGIÇ MOTORLAR ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR (THE STUDIES ON SUBMERSIBLE MOTORS)

Dalgıç motorların tasarım optimizasyonunda, istatistiksel yöntemler ve deterministik yöntemler beraber veya ayrı olarak

kullanıldığı görülmüştür. İstatiksel metotların sürekli ve ayrık parametreleri optimize etmesi, türevsel bilgiler gerektirmemesi ve karmaşık amaç fonksiyonu parametrelerini lokal ekstremumlara takılmadan optimize edebilmesi gibi üstünlüklerine rağmen bilgisayarların hesaplama yeteneklerinin artması ile sonlu elemanlar yöntemi gibi deterministik yöntemler için paket programlar geliştirilmiştir. Bu ticari programlar sayesinde dalgıç motorların analizleri daha kolay yapılır hale gelmiş ve tasarım optimizasyonunda çok sık kullanıldığı görülmüştür. Bazı uygulamalarda istatiksel metotlarla optimize edilen tasarımlar sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmış ve iki yöntemin birbirini tamamlayıcı özelliğine dikkat çekilmiştir.

Asenkron motorlarla ilgili birçok çalışma mevcuttur. Ancak dalgıç motorlarla ilgili sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada dalgıç motorların tasarım ve karakteristik özellikleri ilgili olarak literatürde yer alan kaynaklar değerlendirilmiştir.

Tasarım Optimizasyonu Çalışmaları (Studies of Design Optimization)

Bu bölümde dalgıç asenkron motorların sonlu elemanlar yöntemi ve istatiksel yöntemler kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları ele alınacaktır.

Egidi ve diğ. (2012) dalgıç asenkron motorların soğutma sistemi üzerinde çalışmışlardır. Etkili olmayan soğutma sistemi motorun sıcaklığını düşüremediğini ve dolayısıyla servis faktörünü azalttığını belirtmişlerdir. Isı akışını, soğutma devresini ve ısı transferini de içeren üç boyutlu bir modeli sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuçları daha önce iki boyutlu model ile elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Soğutma sisteminin verimini iyileştirme konusunda soğutma sıvısı hızı ve soğutma devresi geometrisi çok önemli olduğu kanaatine varılmışlardır.

Ahmed ve Toliyat (2007) dalgıç asenkron motor yerine dalgıç sürekli mıknatıslı senkron motor üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Motor kayıpları üzerinde önemli bir etkiye sahip olan hava aralığı sürtünme kayıpları üzerinde

durmuşlardır. Makinanın elektromanyetik tasarımında dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Optimizasyon algoritmaları kullanarak optimize edilen motorun manyetik analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Tasarım aşamasında hesaplamalı akışkan dinamiği analizi yapılmış ve viskoz sürtünme kayıp elemanı bu yöntem ile modellenmiştir.

Danilevich ve diğ. (2008) dalgıç asenkron motorlar için yeni bir rotor tasarlayarak manyetik analiz çalışmalarını sonlu elemanlar yöntemi ile yapmışlardır. Kullandıkları motor 12/18kW, 750/1500V, 3000/6000rpm özelliklerine sahiptir.

Xu ve ark (2009) motorun üç boyutlu modelini ele alarak sargı sonu kaçak akı reaktansını hesaplamışlardır. Deneyisel çalışmalarla elde edilen kaçak akı eğrilerine yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları 31kW dalgıç motor kullanılarak gerçekleştirmişlerdir.

Meng ve diğ. (2010) motorun çalışması esnasında sıcaklığın ölçülmesi çok zor olması nedeniyle rotor ve rulman bölgesinin üç boyutlu modelini oluşturmuşlardır. Motor hava aralığı yağı ile rotor yüzeyi arasındaki konvektif ısı transferi katsayısını, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği teorisini kullanarak belirlemişlerdir. Yüzey üzerinde ısı transferi katsayısı ve elektromanyetik alan ile hesaplanan kayıp değerleri dikkate alarak rotor sıcaklık dağılımını vermişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile diğer yöntemleri karşılaştırmış ve termal modelin doğruluğunu test etmişlerdir.

Jianjun ve diğ. (2010) su altında kullanılan sabit mıknatıslı senkron motor için üç boyutlu bir termal model geliştirmişlerdir. Motorda ısınmaya sebep olan bakır kayıpları, stator demir kayıpları ve viskoz sürtünme kayıplarını teşhis etmişlerdir. Özellikle sıcaklığın neden olduğu güç kayıplarını tartışmışlardır.

Xu ve diğ. (2010) dalgıç motorun yapısal karakteristiklerini incelemek için rotor rulmanları ve statorun etkisini de modele dahil ederek üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlar. Kaçak akı reaktanslarını bu model ile hesaplamışlar ve bulunan değerlerin literatürdekilerle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Mekanik kayıplar, analitik

formüllerle ve hidrodinamiğin temel teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Böylece tasarım metodu iyileştirilmiş ve tasarım hassasiyeti geliştirilmiştir. Elde edilen tasarım sonuçları deneysel yöntemlerle doğrulanmaya çalışılmıştır.

Metwally ve Gastli (2008) normal ve normal olmayan şartlar için dalgıç motorların kaçak manyetik alan ve termal analizini ele almışlardır. Normal olmayan şartlar için tek faz çalışma ve dengesiz yükte çalışma olarak kabul etmişlerdir. Ayrıca düz ve yuvarlak şekilli enerji kablosu kullanımının ne gibi etkileri olabileceğini incelemişlerdir. Deneysel çalışmaları küçük güçlü motorlar kullanarak yapmışlardır. Teorik simülasyonlarını hem gerçek boyut ve hem de küçük güçlü motorlar için sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Dengeli veya dengesiz durumlar ile tek faz çalışma durumunu karşılaştırarak bölgesel manyetik akı ve girdap akımları yoğunluğunun tek faz çalışmada daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Girdap akımları ile bölgesel korozyon arasında güçlü bir ilişki olmadığını gözlemlemişlerdir.

Çunkaş ve Ürkmez (2008), dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonunu çok kriterli genetik algoritma kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Motor tasarımını, bulanık kümeler ve bulanık karar yapma kavramlarından faydalanarak çok kriterli bulanık optimizasyon problemi olarak formüle etmişler ve genetik algoritmalar ile çözmüşlerdir. Optimal tasarımın geçerliliğini doğrulamak için iki boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Optimizasyon sonuçları amaçlanan yöntemin etkisini ve başarısını göstermiştir.

Çunkaş ve diğ. (2011) dalgıç asenkron motorun momentini iyileştirmek için genetik algoritma kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Motorun manyetik alan analizini iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapmışlardır. Ayrıca genetik algoritma parametrelerini incelemişlerdir. Moment iyileşmesinin yanında motorun verimi yükseltilmiş ve maliyeti düşürülmüştür.

Performans ve Karakteristik İncelemeleri (Investigations of Performance and Characteristic)

Metwally ve diğ. (2007) farklı imalatçıların üretmiş olduğu dalgıç asenkron motorların yüksek gerilime (1kV-2kV) karşı dayanıklılık testlerini yapmışlardır. Bütün motorların bir fazı ile gövdesi arasındaki empedansda bir düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca, bütün motorlar standart yüksek gerilim testlerini başarı ile geçmişlerdir. Yeni üretilen motorlarda yağlanmanın daha iyi olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Phang ve diğ. (1998) uzun kabloların ve değişken hızlı sürücülerin aşırı gerilimlere sebep olduğunu ve bu durumların da motor arızalarına neden olduğunu öne sürmüşlerdir. Değişken hızlı sürücü anahtarlamalarında meydana gelen geçici aşırı gerilim ölçümlerini, Texaco Captain WP şirketinden almışlardır. Değişik uzunluk ve kesitteki kablolar için zaman domeni simülasyonları yapılarak aşırı gerilimler tahmin edilmeye çalışılmıştır. Aşırı gerilimleri azaltmak için sisteme RC elemanları eklemişlerdir.

Kirby ve diğ. (2005) dalgıç asenkron motorlarda ayarlanabilir hız kontrol sistemlerinin kullanımının mekanik baskıları azalttığı, çalışma ve durdurma işlemlerinde enerji tasarrufu sağladığını vurgulanmıştır. Sürme devrelerinde yaygın olarak gerilim beslemeli topoloji kullanıldığını öne sürmüşlerdir. Yazarlar akım beslemeli sürme topolojisi üzerinde durarak bu metodolojinin bazı özelliklerine dikkat çekmişlerdir.

Maswood (2006) sürme sistemlerinde, üçgen modülasyon ile sabit v/f oranı motor hızının kontrolünde iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Önerdiği üçgen modülasyon tekniği ile geri besleme sinyalinin kayması, referans sinyalin genliği ve genişliği optimize edildiğini öne sürmüştür. Dalgıç motorun performansı için gerilim beslemeli inverter metodolojisinde, IGBT anahtarlamalarında bu parametrelerin seçimi önemli rol oynadığını belirtmiştir. Akım, gerilim ve giriş güç faktörünün izlenmesinde yeni bir metod kullanmıştır. Motorun yarı kapalı çevrim çalışmasını amaçlamıştır.

Deng ve diğ. (2007) dalgıç asenkron motorun güvenli ve etkili çalışması için hız, sıcaklık gibi parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Motorun

çalışma ortamı ve yapısı itibarıyla motor hızının geleneksel yöntemlerle ölçülemeyeceğinden hareketle sensörsüz hız ölçümü konusunda çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır. Hız ölçümünde klasik metotlardan olan kalman filtresi, model referans adaptif sistem ve rotor mili harmoniği yerine yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Öncelikle simülasyonu Matlab/simulink kullanarak yapmışlar ve daha sonra deneysel çalışmayı Visual Basic programlama diliyle kullanıcı arayüzü geliştirerek gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar yapay sinir ağlarının hız tahmininde başarılı ve etkili olduğunu göstermiştir.

Arabacı ve diğ.(2007) stator akımlarını analiz ederek dalgıç asenkron motorun rotor arızalarının teşhisini yapmışlardır. Rotor üzerinde bazı arızalar oluşturulmuş ve motor performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Stator akımları frekans domen ve spektrumları incelenerek arıza sınıflandırmasını yapay sinir ağları kullanarak yapmışlardır.

Xin ve diğ.(2012) dalgıç motorun üretim veriminin etkilenmemesi için rotor arızalarının zamanında tespit edilmesi gerektiğini ifade etmektedirler. Stator akımları analiz ederek kırık rotor arızasını teşhis edebilmek için HHT algoritmasını kullanmışlardır. Normal, az hatalı ve komple hatalı olmak üzere üç farklı durumu ele almışlardır. Geri yayımlı yapay sinir ağları kullanarak arızaların sınıflandırılmasını yapmışlardır. Sonuçlar uygulanan yöntemin doğruluğunu göstermektedir.

Liu ve diğ. (2011) dalgıç motorların sürekli su altında çalışması ve karmaşık çevre şartları, motor izolasyonlarını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamışlardır. Yüksek gerilimli dalgıç motorun izolasyon ömrünü etkileyen faktörleri ele almışlardır. Geri yayımlı yapay sinir ağları kullanarak yüksek gerilimli dalgıç motorların izolasyon ömrünü tahmin etmeye çalışmışlardır.

Liang ve Fleming (2012) dünya pazarında enerji maliyetlerinin artışına dikkat çekerek petrol kuyularında çalışan dalgıç motorların enerji tüketimi ile ilgili herhangi bir standardın önerilmediğini belirtmişlerdir. Petrol endüstrisinde kullanılan dalgıç motorların güç tüketimini iki yöntemle incelemişlerdir. Metod-1' e göre günlük enerji tüketimi üretilen petrol oranı ile kıyaslanmıştır. Metod-2' de ise komple

pompa verimini dikkate alarak analiz yapmışlardır. Güç tüketiminin iyileştirilmesi ve değerlendirilmesi konusunda genel bir kriter ortaya koymuşlardır.

Kirvelis ve Davies (2003) dinamik modelleme paketi kullanarak elektrikli dalgıç pompa sisteminin üzerindeki meydana gelen ısıнын etkisini incelemişlerdir. Motor ve pompa sisteminde meydana gelen ısıнын, petrol kuyuları üretim değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir.

Batista ve diğ. (2009) elektrikli dalgıç pompa sisteminin bir simülatörünü gerçekleştirmişlerdir. Simülatör; kaynak modeli, elektrik enerjisi iletimi, motorun termal modeli ve sıvı akışı kapsayacak şekilde üç boyutlu animasyon olarak tasarlanmıştır. Böylece petrol kuyularını izleme konusunda daha iyi bilgi sahibi olunacağı ve muhtemel hataların teşhisinde simülatörden faydalanabileceği ifade edilmiştir.

Thorsen ve Dalva (2001) elektriksel ve mekaniksel durumları tahmin edebilmek amacıyla elektrikli dalgıç pompa sisteminin komple bir modelini geliştirmişlerdir. Farklı modelleme teknikleri kullanarak hangi modelin daha iyi sonuçlar verebileceğini incelemişlerdir. Motor modeline manyetik akıdaki doyum ve kaçak akılar dahil edilmiştir. Pompa parametreleri, malzeme katsayıları, tasarım boyutları ve çark sayısı dinamik gerilmeyi etkilediği görülmüştür. Gerçekleştirilen model ile optimum mil çapı bulunmaya çalışılmıştır.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada dalgıç motorların tasarım ve karakteristik özellikleri ilgili olarak literatürde yer alan kaynaklar değerlendirilmiştir. Asenkron motorlarla ilgili birçok çalışmanın mevcut olduğu dalgıç motorlarla ilgili sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmüştür. Dalgıç motorların tasarım optimizasyonunda, istatistiksel yöntemler ve deterministik yöntemler beraber veya ayrı olarak kullanıldığı görülmüştür. İstatistiksel metotların sürekli ve ayrık parametreleri optimize etmesi, türevsel bilgiler gerektirmemesi ve karmaşık amaç fonksiyonu parametrelerini yerel ekstremumlara takılmadan optimize edebilmesi gibi üstünlüklerine karşın

son zamanlarda bilgisayarların hesaplama yeteneklerinin artması ile sonlu elemanlar yöntemi gibi deterministik yöntemler için paket programlar geliştirilmiştir. Bu ticari programlar sayesinde dalgıç motorların analizleri daha kolay yapılır hale gelmiş ve tasarım

optimizasyonunda çok sık kullanıldığı görülmüştür. Bazı uygulamalarda istatistiksel metotlarla optimize edilen tasarımlar sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmış ve iki yöntemin birbirini tamamlayıcı özelliğine dikkat çekilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmed S., Toliyat H. A. 2007. "Coupled Field Analysis Needs in the Design of Submersible Electric Motors", *Electric Ship Technologies Symposium (ESTS '07)*, 231-237.
- Arabacı H., Bilgin O., Ürkmez A. 2007. "The Detection of Rotor Faults in the Manufacturing of Submersible Induction Motor", *Int. Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP '07)*, 222-225.
- Batista E.S, Costa R.O, Maitelli A.L, Barbosa T.S, Salazar A.O, 2009, "Computer Simulation for Oil Wells with Artificial Lift Method by Electrical Submersible Pump", *10th International Symposium on Process Systems Engineering*, 393-398.
- Bilgin, O. 2002, *Dalgıç asenkron motorların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ve performansının iyileştirilmesi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Boldea I., Nasar, S.A., 2002, *The Induction Machine Handbook*, CRC Press.
- Choudhury, MA, Azizur Rahman, M., 1992, "Starting performances of Delta-Modulated inverter-fed submersible induction motors," *IEEE Trans. on Industry Appl.* 28(3):685-693.
- Çunkaş M., Akkaya R., Bilgin O. 2011, "Torque Optimization of Submersible Motors Using Evolutionary Algorithms". *INISTA 2011*, Istanbul, TURKEY.
- Çunkaş M., Ürkmez A. 2008, "Çok kriterli Bulanık Genetik Algoritma ile Dalgıç Asenkron Motorların Tasarım Optimizasyonu", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* Cilt 23, No 3, 645-653.
- Danilevich J.B., Antipov V.N, Kruchinina I.Y, Khozikov YP, 2008, "Design Considerations of Submersible Unprotected Solid-Rotor Induction Motor", *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, 1-4.
- Deng, H. Xue, B. Xu, DG., Wang LG, Yang j., 2007, "Research on the Speed Estimation for Submersible Motor Based on ELMAN Neural Network", *Proceeding of the CSEE*, 27(24), 102-106.
- Egidi N., Maponi P., Misici L., Rubino S.. 2012, "A three-dimensional model for the study of the cooling system of submersible electric pumps", *Mathematics and Computers in Simulation* (in press).
- Ertöz A.Ö. 2001, "Jeotermal akışkanların pompajı", *7. Ulusal Tesisat Müh. Kongresi*, 109-116, İzmir.
- Haupt Randy L., Haupt Sue E. 2004. *Practical Genetic Algorithms*. A Willey-Interscience Publication, USA
- Jianjun L., Jibin Z., Xintong J., Xinghe F.. 2010, "Electrical-thermal Coupled Calculation of a Submersible Motor Used for Deep-sea Electromagnetic Propeller". *14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 1.
- Kalenderli Ö. 1996, *Elektirik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi*, Ders Notları, İstanbul, 1996. (basılmamış).
- Kirby H., Paes R., Flores J., 2005, "Speed Control of Electric Submersible Pumps – The Current Approach". *Industry Applications Conference*, 1908-1918.
- Kirvelis R., Davies D. R., 2003, "Enthalpy balance model leads to more accurate modelling of heavy oil production with an electric submersible pump", *Trans Int. Chem. Eng. Part A*, Vol 81, 342-351.
- Lähteenmäki J. 1997, *Genetic algorithm in optimisation of electric machines*. Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics.
- Liang X, Fleming E., 2012, "Power Consumption Evaluation for Electrical Submersible Pump Systems", *Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, 1-6. Louisville, USA.

- Liu B., Bao XH., Liu J., Zhu QL., 2011, "Insulation Life Prediction of High Voltage Submersible Motor Based on BP Neural Network". *Int. Conference on Consumer Electronics Communications and Networks (CECNet)*, 418-421, XianNing, China.
- Maswood A.I., 2006, "A Submersible Motor with an Advanced Delta Modulated Inverter Driver.", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*.1-4.
- Meng D., Liu Y., Xu Y., Zhang Q. 2010, "Analysis and Calculation of 3-D Temperature Field of Submersible Motor Rotor", *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 1-4.
- Metwally I.A., Gastli A., 2008, "Correlation between eddy currents and corrosion in electric submersible pump systems", *International Journal of Thermal Sciences* 47, 800-810.
- Metwally I.A., Gastli A., Al-Sheikh M. 2007, "Comparative investigation of lightning impulse tests on electrical submersible pump motors", *Electric Power Systems Research*, 77, 1065-1072.
- Özoğlu, Y. 1995, *Sonlu elemanlar metodu ile doğru akım motorunun manyetik alan incelemesi*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enst., İstanbul.
- Palko S., 1996. *Structural optimization of induction motor using a genetic algorithm and a finite element method*. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No. 4, Helsinki.
- Phang W., Brogan P., Lightbody G., Yacamini R., Scott A., 1998, "Reduction of overvoltages on ESP systems", *8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings*, 970-975.
- Silvester P.P, Ferrari R.L., 1983, *Finite elements for electrical engineers*, Cambridge Univ. Press.
- Thorsen OV, Dalva M., 2001, "Combined Electrical and Mechanical Model of Electric Submersible Pumps". *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 37(2), 541-547.
- Xin Lv, Zhuo H., Ligu W., Linlin L., Dianguo X., 2012, "Submersible Motor Rotor Bars Broken Fault Analysis Based on HHT", *IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia*, June 2-5, Harbin, China, 2398-2404.
- Xu Y., Meng D., Liu Y., Zhang Q. 2010. "Amelioration Research of Submersible Motor Design Method", *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 1-4
- Xu Y., Meng D., Wen J. 2009, "Numerical Calculation of End Leakage Reactance of Submersible Motor", *International Conference on Energy and Environment Technology*, 184-188.

